

Silikon Kristal vs Silikon Amorf Perbedaan Struktural dalam Aplikasi Fotovoltaik

Soni Prayogi*

Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Pertamina. Jakarta. Indonesia

*Corresponding Author

E-mail Address: prayogi.sp@gmail.com

ABSTRAK

Pada studi ini, kami melaporkan secara singkat tentang struktur silikon kristal, silikon amorf, dan silikon amorf terhidrogenasi dalam menyoroti perbedaan struktural. Kemudian, pada bagian struktur ini kami menyajikan perbandingan berbasis fitur-demi-fitur antara sel surya c-Si dan sel surya a-Si. Bagaimana peran struktur silikon yang berbeda dalam setiap karakteristik PV selanjutnya dieksplorasi. Pada akhirnya, berdasarkan fitur-fitur yang dianalisis sebelumnya, kami melakukan pembahasan lebih lanjut tentang keadaan di mana penggunaan sel surya c-Si atau a-Si. Singkatnya, efisiensi konversi yang luar biasa dan biaya yang ramah pengguna sel surya silikon kristalin terbukti berhasil, sementara sifat mengganggu sel surya silikon amorf menunjukkan beberapa sifat optik dan listrik, seperti koefisien penyerapan tinggi dan Efek Staebler-Wronski, yang belum pernah diantisipasi sebelumnya.

Kata Kunci: c-Si, a-Si, a-Si: H, fotovoltaik

PENDAHULUAN

Dengan dimulainya krisis energi dunia, sumber energi terbarukan seperti matahari, angin, dan pasang surut telah menarik banyak investasi. Menurut laporan Badan Energi Internasional, antara 2019 dan 2024, kapasitas energi terbarukan akan meningkat sebesar 50%, dengan PV surya saja menyumbang 60% dari pertumbuhan yang diproyeksikan (Renewables 2019 – Analysis n.d). Oleh karena itu, sel surya sebagai inti dari energi matahari layak untuk dibahas. Secara umum, dua kategori utama sel surya, berbasis wafer dan film tipis, telah mencapai kemajuan yang signifikan (Fonash 2010).

Silikon kristal (c-Si) mendominasi sel surya berbasis wafer. Di sisi lain, silikon amorf (a-Si) memainkan peran penting dalam sel surya film tipis (Despotou 2012). Namun, kedua jenis sel surya menggunakan silikon. Bagaimana unsur yang sama, silikon, berbeda dalam sifat optoelektronik? Jawabannya terletak pada perbedaan struktural yang satu berbentuk kristal sedangkan yang lainnya amorf.

Harus dicatat bahwa, karena sifat dasarnya berbeda, perbandingan langsung silikon kristal dengan silikon amorf adalah murni teoretis. Namun, studi ini akan membahas berdasarkan perbandingan karakteristik demi karakteristik

dalam upaya untuk mengurangi ketidakkonsistenan tersebut.

STRUKTUR MATERIAL

Silikon kristal (c-Si)

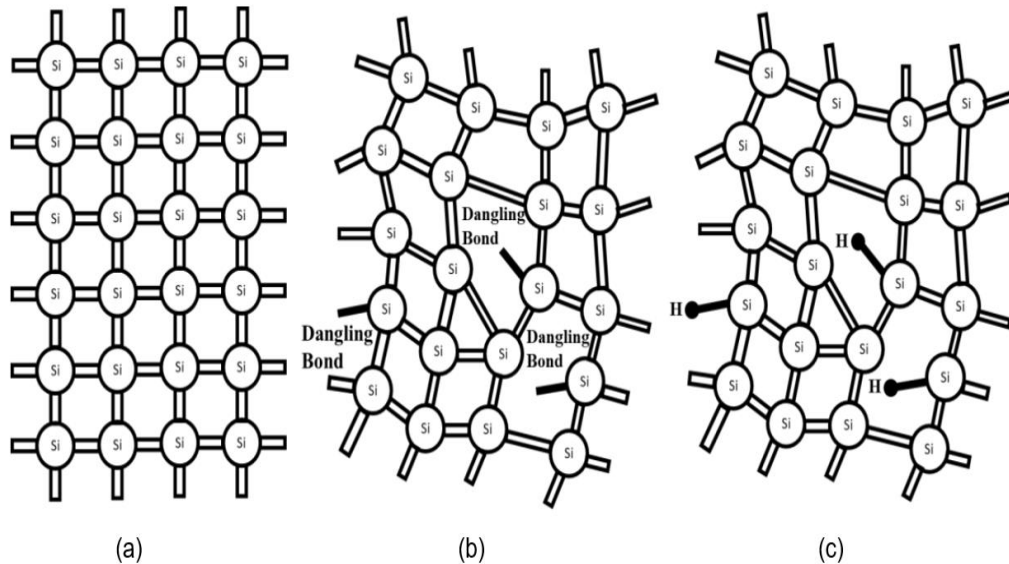
Silikon kristal terdiri dari dua kategori berbeda: silikon monokristalin (mono-Si) dan silikon polikristalin (poli-Si) (Sundaram, Benson, and Mallick 2016). Silikon monokristalin bersifat homogen. Ini terdiri dari satu kristal kontinu tanpa batas butir. Orientasi atom silikon dan parameter kisi tetap konstan di seluruh material (Krenckel et al. 2021). Sebaliknya, silikon polikristalin terdiri dari beberapa kristal silikon kecil. Baik silikon monokristalin atau silikon polikristalin, atom silikon terikat secara tetrahedral ke empat atom yang berdekatan, seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 1 (a). Struktur tetrahedral ini membentuk kisi kristal yang terdefinisi dengan baik atau bahkan ideal.

Silikon amorf (a-Si)

Silikon amorf adalah non-kristal, seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 1 (b). Satu perbedaan yang jelas adalah bahwa tatanan jarak jauh sudah tidak ada lagi (Illiberi et al. 2011). Ikatan menjuntai yang dihasilkan, valensi yang tidak terpenuhi pada atom silikon yang tidak

bergerak, berada pada orde $10^{19}/\text{cm}^3$. Permasalahan pertama dan terpenting, ikatan yang menjuntai berfungsi sebagai pusat rekombinasi, sangat mengurangi masa pakai pembawa, yang merupakan kebalikan dari upaya untuk memisahkan pembawa muatan dalam sel surya (Prayogi, et al 2022). Lebih buruk lagi,

cacat menyematkan tingkat energi Fermi sehingga silikon amorf tidak dapat didoping menjadi tipe-p atau tipe-n. Ini adalah semikonduktor yang jarang digunakan, kehilangan semua karakteristik lain yang diinginkan untuk persiapan perangkat elektronik.



Gambar 1. Skema diagram struktur silikon kristal (a), silikon amorf (b), dan silikon amorf terhidrogenasi (c)

Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H)

Untungnya, Chittick, Alexander, dan Sterling adalah yang pertama menemukan solusi yang efektif (Chittick, Alexander, and Sterling 1969). Menggunakan teknik lucutan pijar (menerapkan voltase antara dua elektroda di kedua ujung tabung kaca untuk membentuk plasma dari gas yang terkandung), Chittick, Alexander, dan Sterling memisahkan gas silan (SiH_4) pada substrat yang dipanaskan. Terbukti bahwa, dengan penggabungan hidrogen 10% selama pengendapan, kerapatan cacat sangat berkurang hingga $10^{16}/\text{cm}^3$ (Tuttle 2018). Setiap atom hidrogen bergabung dengan ikatan menggantung yang sebelumnya ada dalam silikon amorf, menghasilkan bahan eksotis, silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H), seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 1 (c). Pengurangan kepadatan cacat akhirnya memungkinkan silikon amorf terhidrogenasi untuk didoping dan dapat digunakan secara luas dalam perangkat sambungan.

PERBANDINGAN SIFAT FOTOVOLTAIK

Efisiensi konversi optik-listrik

Salah satu parameter kunci yang mengevaluasi kinerja sel surya adalah efisiensi konversi. Tolak ukurnya sama pada kejadian yang sama daya lampu, semakin banyak keluaran listrik, semakin baik. Seperti tercantum dalam Tabel 1, sel surya silikon amorf memiliki efisiensi konversi 14,0% sedangkan sel surya silikon kristal memiliki efisiensi konversi sekitar 22,3% hingga 26,1% (Prayogi et al. 2022). Jelas, sel surya c-Si mengungguli sel surya a-Si dalam hal efisiensi konversi.

Ada alasan struktural di belakang. Keberhasilan pengoperasian sel surya bergantung pada dua proses mendasar penyerapan foton untuk menghasilkan pembawa muatan dan transportasi berikutnya serta pengumpulan pembawa muatan untuk menghasilkan listrik (Hamdani et al. 2022). Meskipun hidrogenasi mengurangi jumlah ikatan yang menjuntai membuat silikon amorf dapat diakses, densitas cacat $10^{16}/\text{cm}^3$ masih dramatis dibandingkan dengan silikon

kristalin (Irvine 2007). Pusat rekombinasi (di mana lubang positif dan elektron negatif bergabung) yang timbul dari cacat mempersingkat masa pakai pembawa dan

membuat pengangkutan pembawa muatan menjadi tantangan, menghasilkan efisiensi konversi yang lebih rendah.

Tabel 1 Properti Fotovoltaik untuk sel surya a-Si dan c-Si

Photovoltaic Properties	Hydrogenated Amorphous Silicon	Crystalline Silicon
Optical-Electrical Conversion Efficiency	14.0% (a-Si:H)	22.3%~26.1%
Bandgap	1.75eV	1.1eV
Sufficient Thickness	1~2 μm	100 μm
Spectral Range (75%~85% QE)	550~700nm	440~650nm
Temperature Coefficient (Above 25%)	-0.2~0.25%/°C	-0.4~0.5%/°C
Area Required/kW (m^2)	15	7~8

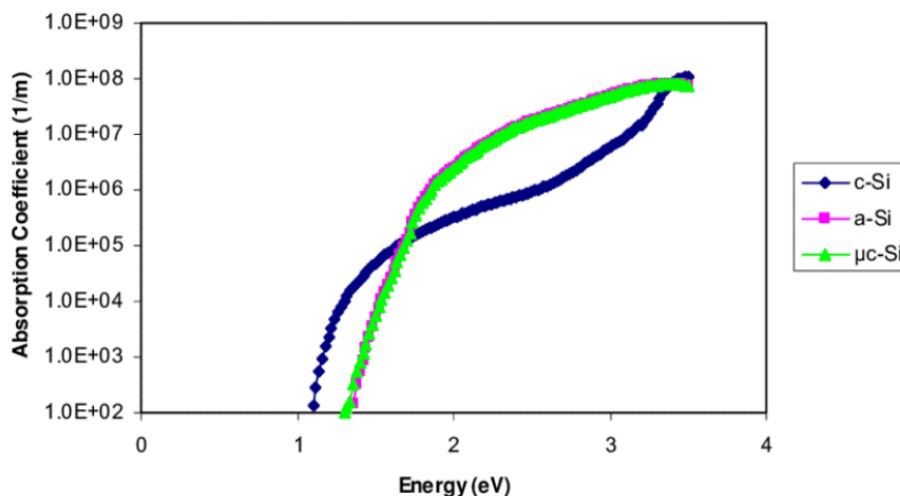
Koefisien penyerapan

Parameter lain yang berpengaruh untuk sel surya adalah kemampuan menyerap cahaya. Mengenai koefisien penyerapan, silikon amorf menunjukkan keunggulan yang menentukan. Seperti yang diilustrasikan oleh Gambar. 2, dalam menyerap foton dengan energi di atas 1,8 eV ($hf \geq 1,8\text{eV}$), silikon amorf memiliki urutan koefisien penyerapan yang lebih besar daripada silikon kristal.

Struktur lagi memainkan peran penting. Struktur kristal yang terdefinisi dengan baik berarti panjang ikatan dan sudut ikatan yang terdefinisi dengan baik dalam silikon kristal, yang mewakili homogenitas internal (Hamdani et al. 2022). Efek hamburan cahaya internal itu sepele. Sebaliknya, struktur amorf, atau non-kristal berarti mengganggu panjang ikatan dan sudut ikatan dalam silikon amorf, mewakili ketidakhomogenan internal (Kasap et al. 2007). Ketidak-homogenan internal ini berkontribusi

pada hamburan cahaya internal. Oleh karena itu, sel surya silikon amorf menyerap cahaya secara efisien.

Pada kenyataannya, koefisien penyerapan yang tinggi memiliki setidaknya dua tujuan. Pertama, jika jumlah cahaya yang diserap sama, kebutuhan material untuk silikon amorf lebih sedikit (Flewitt 2012). Seperti tercantum dalam Tabel 1, ketebalan total lapisan penyerap adalah sekitar 1 sampai 2 μm dalam sel surya a-Si dan sekitar 100 μm dalam sel surya c-Si. Dengan kata lain, seperseratus bahan digunakan untuk menyerap sinar matahari dibandingkan dengan sel konvensional (Welser et al. 2019). Selain itu, dalam kondisi cahaya redup dan menyebar, koefisien penyerapan yang lebih tinggi berarti penangkapan cahaya yang lebih baik. Oleh karena itu, sel surya a-Si merupakan pilihan yang lebih baik untuk penggunaan di dalam ruangan daripada sel surya c-Si.



Gambar 2. Koefisien absorpsi silikon kristalin (c-Si) dan silikon amorf (a-Si) pada pita energi penyinaran spektral maksimum

Stabilitas listrik

Stabilitas listrik adalah parameter penting lainnya. Sifat terhidrogenasi datang dengan biaya. Salah satu jenis degradasi akibat cahaya, yang dikenal sebagai Efek Staebler-Wronski (SWE), unik untuk sel surya a-Si. Secara umum, efek menguntungkan dari hidrogenasi pada silikon amorf memburuk di bawah penerangan (Prayogi et al. 2021). Dalam 100 jam pertama di bawah paparan cahaya, sel surya a-Si menunjukkan penurunan efisiensi yang stabil (10% ~ 15%) yang diukur dengan penurunan fotokonduktivitas dan konduktivitas gelap. Apa yang menjadi sangat menarik adalah fakta bahwa Efek Staebler-Wronski (SWE) bersifat metastabil. Setelah paparan cahaya 100 jam pertama, kinerja sel tetap cukup stabil.

Struktur menyebabkan degradasi akibat cahaya. Sejauh ini, telah ditemukan bahwa degradasi berhubungan dengan difusi hidrogen yang relatif tinggi dan perubahan koordinasi ikatan lokal (Guo-gang and Guang-lin 1988). Namun, penyebab pasti Efek Staebler-Wronski belum sepenuhnya dipahami. Secara historis, model peralihan ikatan hidrogen lebih disukai. Ini menunjukkan bahwa pembawa fotogenerasi dapat bergabung kembali di dekat ikatan Si-Si yang lemah, melepaskan energi yang cukup untuk memutuskan ikatan Si-Si (Schulze et al. 2010). Kemudian, atom H yang berdekatan membentuk ikatan baru dengan salah satu atom silikon, meninggalkan ikatan yang menggantung. Ikatan yang menjuntai ini dapat menjebak pasangan elektron-lubang, sehingga mengurangi arus yang melewatinya (Zhao et al. 2017). Diuji terhadap pengamatan eksperimental terbaru, penjelasannya menjadi kompleks. Hubungan antara hidrogenasi dan degradasi akibat cahaya sudah jelas, tetapi persisnya bagaimana atau tepatnya di mana cacat akibat cahaya terjadi masih belum jelas (Cahyono et al. 2017). Tidak adanya hubungan spasial antara atom hidrogen yang tergabung dan ikatan yang menggantung adalah tantangan utama dalam memahami dan pencegahan lebih lanjut dari Efek Staebler-Wronski (Ren et al. 2018).

Stabilitas suhu

Sel surya bekerja di bawah sinar matahari. Oleh karena itu, penyerapan panas tidak dapat dihindari. Dalam kebanyakan kasus, suhu sel bisa mencapai sekitar 70°C di bawah sinar matahari yang cerah. Seperti tercantum dalam Tabel 1, di atas 25°C, kekuatan sel surya silikon

kristal menurun 0,4 ~ 0,5% dengan kenaikan suhu 1°C. Sebaliknya, kekuatan sel surya silikon amorf berkurang 0,2 ~ 0,25% dengan kenaikan suhu 1 °C (Baskar and Pratibha Nalini 2016). Secara keseluruhan, sel surya silikon amorf tidak sensitif terhadap suhu dibandingkan dengan sel surya silikon kristalin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada akhirnya, silikon kristal dan silikon amorf, mana yang lebih baik? Jawabannya tidak langsung. Berdasarkan karakteristik yang dianalisis sebelumnya, mungkin masuk akal untuk membahas kondisi berikut.

Kondisi di mana c-Si atau a-Si mungkin sesuai

Faktor-faktor yang berhubungan dengan area tidak kritis. Misalnya, pembangkit listrik tenaga surya selalu memiliki ruang yang luas (di mana pertimbangan lain seperti kepadatan daya atau biaya keseluruhan didahulukan).

Kondisi di mana c-Si lebih tepat

Ruang instalasi terbatas. Karena sel surya c-Si memiliki efisiensi konversi yang lebih tinggi, area yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya 1 kW adalah setengah dari area yang dibutuhkan oleh sel surya a-Si. Harga yang bersangkutan. Saat ini, dibandingkan dengan sel surya a-Si, biaya per watt sel surya c-Si adalah setengahnya atau kurang.

Kondisi di mana a-Si lebih tepat

Dalam kondisi cahaya buatan (dalam ruangan). Karena sel surya a-Si memiliki koefisien penyerapan yang lebih tinggi dan rentang spektral khas sumber cahaya buatan, ini adalah pilihan yang lebih baik. Faktor yang berhubungan dengan berat badan dipertimbangkan. Seperti disebutkan sebelumnya, sel surya a-Si lebih tipis. Oleh karena itu, densitas berat untuk sel surya a-Si lebih rendah, hanya seperempat dari pasangan kristalnya. Jadi, sel surya a-Si tidak memberikan beban tambahan yang berlebihan pada bangunan.

Dalam aplikasi daya mikro. Misalnya, kalkulator bertenaga surya biasanya menggunakan sel surya a-Si karena kemampuan produksi massal. Estetika desain diperlukan. Fleksibilitas sel surya a-Si memungkinkan integrasi tanpa batas

ke dalam perangkat. Di lingkungan bersuhu tinggi. Karena sel surya a-Si kurang sensitif terhadap suhu dibandingkan sel surya c-Si, kinerja keseluruhannya lebih baik. Perlindungan lingkungan menjadi perhatian. Karena sel surya a-Si tidak menggunakan logam berat beracun seperti kadmium atau timbal, mereka adalah salah satu aplikasi fotovoltaiik yang paling ramah lingkungan.

PENUTUP

Singkatnya, perbedaan struktural silikon sangat berarti dalam aplikasi fotovoltaiik. Meskipun memiliki masalah efisiensi dan stabilitas yang rendah, sel surya silikon amorf memiliki keunggulan proses manufaktur yang standar dan sederhana. Namun, sel surya silikon kristal secara bertahap mengambil tanah karena biaya yang sebanding. Sulit untuk mengatakan teknologi mana yang mendominasi yang lain. Sebaliknya, masing-masing memiliki keunikan yang tak tergantikan.

REFERENSI

- Baskar, Sam, and R. Pratibha Nalini. 2016. "Synthesis and Characterization of Silicon Nanocrystals in SiC Matrix Using Sputtering and PECVD Techniques." *Materials Today: Proceedings* 3(6): 2121–31.
- Cahyono, Yoyok et al. 2017. "Efek Staebler-Wronski Dan Pengaruh Waktu Anil Pada Lapisan Instrinsik Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)." *Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 13(2): 59–62.
- Chittick, R. C., J. H. Alexander, and H. F. Sterling. 1969. "The Preparation and Properties of Amorphous Silicon." *Journal of The Electrochemical Society* 116(1): 77.
- Despotou, E. 2012. "1.10 - Vision for Photovoltaics in the Future." In *Comprehensive Renewable Energy*, ed. Ali Sayigh. Oxford: Elsevier, 179–98.
- Flewitt, A. J. 2012. "Hydrogenated Amorphous Silicon Thin Film Transistors (a Si:H TFTs)." In *Handbook of Visual Display Technology*, eds. Janglin Chen, Wayne Cranton, and Mark Fihn. Berlin, Heidelberg: Springer, 627–46..
- Fonash, Stephen J. 2010. "Chapter Three - Structures, Materials, and Scale." In *Solar Cell Device Physics (Second Edition)*, ed. Stephen J. Fonash. Boston: Academic Press, 67–120.
- Guo-gang, Qin, and Kong Guang-lin. 1988. "A New Model for the Staebler-Wronski Effect." *Philosophical Magazine Letters* 57(2): 117–22.
- Hamdani, Dadan et al. 2022. "The Effects of Dopant Concentration on the Performances of the A-SiOx:H(p)/a-Si:H(I1)/a-Si:H(I2)/Mc-Si:H(n) Heterojunction Solar Cell." *International Journal of Renewable Energy Development* 11(1): 173–81.
- Illiberi, A. et al. 2011. "Effect of Ion Bombardment on the A-Si:H Based Surface Passivation of c-Si Surfaces." *Applied Physics Letters* 98(24): 242115.
- Irvine, Stuart. 2007. "Solar Cells and Photovoltaics." In *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, Springer Handbooks, eds. Safa Kasap and Peter Capper. Boston, MA: Springer US, 1095–1106.
- Kasap, Safa et al. 2007. "Optical Properties of Electronic Materials: Fundamentals and Characterization." In *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, Springer Handbooks, eds. Safa Kasap and Peter Capper. Boston, MA: Springer US, 47–77.
- Krenckel, Patricia et al. 2021. "Propagation of Crystal Defects during Directional Solidification of Silicon via Induction of Functional Defects." *Crystals* 11(2): 90.
- Prayogi, Soni et al. 2021. "The Effect of Adding an Active Layer to the Structure of A-Si: H Solar Cells on the Efficiency Using RF-PECVD." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 32(6): 7609–18.
- Prayogi, Soni, Yoyok Cahyono, and D. Darminto. 2022. "Electronic Structure Analysis of A-Si: H p-I1-I2-n Solar Cells Using Ellipsometry

Spectroscopy.” *Optical and Quantum Electronics* 54(11): 732.

Prayogi, Soni, Yoyok Cahyono, Dadan Hamdani, and Darminto. 2022. “Effect of Active Layer Thickness on the Performance of Amorphous Hydrogenated Silicon Solar Cells.” *Engineering and Applied Science Research* 49(2): 201–8.

Ren, Ningyu et al. 2018. “Controlling Performance of A-Si:H Solar Cell with SnO₂:F Front Electrode by Introducing Dual p-Layers with p-a-SiO_x:H/p-Nc-SiO_x:H Nanostructure.” *Solar Energy* 171: 907–13.

“Renewables 2019 – Analysis.” IEA. <https://www.iea.org/reports/renewables-2019> (November 29, 2022).

Schulze, T. F. et al. 2010. “Impact of A-Si:H Structural Properties on the Annealing Behavior of a-Si:H/c-Si Heterostructures Used as Precursors for High-Efficiency Solar Cells.” *MRS Online Proceedings Library* 1268(1): 107.

Sundaram, Senthilarasu, David Benson, and Tapas Kumar Mallick. 2016. “Chapter 2 - Overview of the PV Industry and Different Technologies.” In *Solar Photovoltaic Technology Production*, eds. Senthilarasu Sundaram, David Benson, and Tapas Kumar Mallick. Academic Press, 7–22.

Tuttle, Blair R. 2018. “Dangling Bond Defects in SiC: An *Ab Initio* Study.” *Physical Review B* 97(4): 045203.

Welser, Roger E. et al. 2019. “Design and Demonstration of High-Efficiency Quantum Well Solar Cells Employing Thin Strained Superlattices.” *Scientific Reports* 9(1): 13955.

Zhao, Lei et al. 2017. “Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Excellent A-Si:H Passivation Layers for a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells at High Pressure and High Power.” *Frontiers in Energy* 11(1): 85–91.

BIODATA PENULIS

Nama : Soni Praayogi

Tempat/Tanggal Lahir : Aceh, 02 Januari 1990.

Institusi: Universitas Pertamina